

Пластификация полиакриламида Plasticization of polyacrylamide

А.С. РОДИН, Н.Д. БУРМИСТРОВ, И.М. ДВОРКО, Н.А. ЛАВРОВ

A.S. RODIN, N.D. BURMISTROV, I.M. DVORKO, N.A. LAVROV

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Россия
Saint-Petersburg State Institute of Technology, St. Petersburg, Russia
andrearodin@mail.ru

На основе литературных данных проведен анализ влияния различных пластифицирующих и модифицирующих веществ на температуру стеклования полиакриламида. Рассмотрена возможность применения пластифицирующих добавок для улучшения технологических и эксплуатационных характеристик полиакриламида и композиций на его основе.

Ключевые слова: полиакриламид, пластификация, температура стеклования, многоатомные спирты, дифференциальная сканирующая калориметрия, термомеханический анализ

Based on literature data, the influence of various plasticizing and modifying substances on the glass transition temperature of polyacrylamide was analyzed. The possibility of using plasticizing additives to improve the technological and operational characteristics of polyacrylamide and compositions based on it is considered.

Keywords: polyacrylamide, plasticization, glass transition temperature, polyhydric alcohols, differential scanning calorimetry, thermomechanical analysis

DOI: 10.35164/0554-2901-2024-03-32-35

Полиакриламид широко используется в промышленности в процессах очистки воды [1, 2], в производстве полимерных композиционных материалов [3–5]. Введение пластификаторов позволяет оптимизировать свойства получаемых композиций, способствует разработке новых конструкционных материалов с такими улучшенными характеристиками, как гибкость, прочность, стойкость к внешним воздействиям. Степень проработанности данной тематики недостаточно высока, процесс пластификации полиакриламида остается малоизученным. Целью данной работы является анализ влияния различных пластифицирующих и модифицирующих веществ на степень изменения температуры стеклования полиакриламида.

Пластификаторы – это добавки, обычно представляющие собой небольшие органические молекулы, которые при введении в полимеры обеспечивают снижение межмолекулярного взаимодействия. Это ведет к снижению температуры стеклования полимеров, повышению их деформируемости и улучшению технологичности при переработке [6].

Для обеспечения снижения межмолекулярного взаимодействия и повышения подвижности сегментов полимерной цепи используют либо введение таких добавок непосредственно в объем полимера – внешняя пластификация, либо за счет изменения химической структуры элементарных звеньев полимера в процессе его синтеза (прививка, сополимеризация) – внутренняя пластификация.

При внешней пластификации обеспечивается большая гибкость при корректировке конечных свойств полимера, учитывая, что пластификатор добавляется после полимеризации [7]. Количество и тип пластификатора можно подобрать для получения широкого спектра рецептур и свойств продукта, а также для придания различных уровней температуры стеклования и эластичности в зависимости от желаемого применения.

При введении пластификатора в объем полимера химических связей не образуется, пластификатор при ограниченной совместимости с полимером с течением времени может мигрировать (выпотевать) из объема на поверхность. В этом случае не только повышается температура стеклования, снижается эластичность материала, но вероятно и загрязнение окружающей среды, и негативное воздействие на человека [7]. В случае химической модификации структуры полимера эффект выпотевания отсутствует и пластифицирующий эффект сохраняется, как при переработке

материала, так и эксплуатации изделий из него [8]. Однако для создания пластифицирующего эффекта сополимеризацию используют реже, часто для конкретных целей, поскольку фиксированные химические связи обеспечивают ограниченный диапазон свойств по сравнению с внешними пластификаторами [7].

Любые пластификаторы снижают межмолекулярное взаимодействие, увеличивают свободный объем, снижают температуру стеклования. Межмолекулярные пластификаторы – это термин, относящийся к «внешним» пластификаторам, то есть тем, которые вводятся в объем полимера и не образуют с ним химических связей. Межструктурные пластификаторы ограниченно совместимы с полимером, поэтому они не диффундируют в надмолекулярные образования, а располагаются между ними, экранируя полярные группы, находящиеся на поверхности надмолекулярных образований. Этим они отличаются от межмолекулярных, которые встраиваются между полярными группами макромолекул и экранируют их. Межструктурные пластификаторы обеспечивают снижение температуры стеклования и вязкости расплавов при гораздо меньших концентрациях, чем межмолекулярные, но ограниченная совместимость с полимером снижает устойчивость системы к выпотеванию [7].

Температура стеклования полимера (T_c) – это температура, при которой свободный объем снижается до 2,5% от объема полимера, и материал переходит при охлаждении из высокоэластического состояния в стеклообразное, теряя свою способность к деформируемости. Наиболее стандартными термическими методами определения температуры перехода являются термомеханический анализ (ТМА), динамический механический анализ (ДМА) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК).

ТМА используется для измерения коэффициента термического расширения полимеров. ТМА использует механический подход для измерения T_c . Чувствительный зонд измеряет расширение испытываемого образца при нагревании. Полимеры обычно расширяются при повышении температуры, по кривой расширения можно рассчитать КТР (коэффициент теплового расширения) в диапазоне температур. Если материал проходит через T_c во время испытания ТМА, форма кривой значительно меняется, и T_c можно рассчитать [9].

Большая часть научных работ по анализу пластификации полиакриламида, опубликованных в России, была проведена с помощью метода ТМА на консистометре Хепплера. Консистометр

метр Хепплера – это прибор для исследования свойств полимеров и их концентрированных растворов. Данный прибор позволяет изучать деформацию полимеров в широком диапазоне температур и при приложении постоянной нагрузки разной величины и в разное время. С помощью данного прибора можно изучать вязкость как чистых полимеров, так и их растворов разной концентрации, особенно высокой, при различных скоростях и напряжениях сдвига [10]. В работах, представленных ниже, консистометр Хепплера применялся для получения термомеханических кривых композиций на основе полиакриламида и нахождения по ним T_c полимера.

ДСК использует метод теплового потока и сравнивает количество тепла, подаваемого к испытываемому образцу и аналогично нагретому «эталонному» образцу. Определение точки перехода (T_c) рассчитывается с использованием метода половинной высоты в переходной области. Скорость нагрева и история нагрева образца – это несколько факторов, которые могут повлиять на результат теста. Для материалов с широким температурным интервалом перехода в стеклообразное состояние ДСК может оказаться недостаточно чувствительным, чтобы показать весь переход для целей расчета [11].

ДМА является наиболее чувствительным методом (из обсуждаемых методов) для анализа T_c , поскольку напрямую измеряет молекулярные изменения внутри материала. ДМА измеряет реакцию материала на приложенную колебательную деформацию (или напряжение), а также то, как эта реакция меняется в зависимости от температуры, частоты или того и другого параметра. ДМА позволяет разделять и измерять упругие и вязкие компоненты деформации полимеров. При использовании ДМА T_c можно оценить с помощью трех отдельных методов: начала снижения модуля упругости, локализованного максимума в пределах модуля потерь или локализованного максимума в пределах $\tan \Delta$ [12].

Полиакриламид (ПАА) – общее название группы полимеров и сополимеров на основе акриламида, содержащих амидные группы [13] и используемых в качестве сырья для производства различных материалов. На основе ПАА получают композиционные полимерные материалы, но высокая температура стеклования ПАА усложняет его переработку. Совмещение некоторых органических соединений и порошкообразного ПАА приводит к существенному снижению температуры стеклования в результате пластификации композиций и возможности формования изделий и материалов из них [14]. Это представляет большой практический интерес.

В литературных источниках указаны разные значения температуры стеклования полиакриламида, что обусловлено многими факторами: молекулярная масса, остаточная влага, давление на образец при снятии ТМК, химическая структура, полярные группы, химическая сшивка, термическое разложение и пластификаторы.

Молекулярная масса. Соединения с более высокой молекулярной массой имеют более высокие значения T_c , поскольку их суммарное межмолекулярное взаимодействие сильнее и для разрушения требуется больше энергии. T_c ПАА может колебаться от 175 до 179°C в зависимости от молекулярной массы полимера [15].

В исследовании [16] приводится экспериментальная зависимость T_c ПАА от его молекулярной массы. С увеличением молекулярной массы ПАА увеличивается и его T_c , что подтверждает теоретические данные.

Остаточная вода. ПАА проявляет гигроскопические свойства за счет гидрофильных функциональных групп ($-\text{NH}-\text{C}(\text{O})$, $-\text{NH}_2$), что приводит к наличию остаточной влаги в полимере. Содержание влаги может влиять на значение T_c материала, поскольку она может пластифицировать полимер. Молекулы воды снижают межмолекулярное взаимодействие и увеличивают объем между полимерными цепями, что приводит к снижению значения T_c .

Английскими учёными [17] было исследовано влияние воды на температуру стеклования полиакриламида. Указывается интервал температур стеклования полиакриламида 153–188°C в зависимости от содержания остаточной воды в полимере (T_c для ПАА около 200°C). В ходе эксперимента было выявлено, что полиакриламид прочно связывает 2–9% воды, несмотря на интенсивную сушку. Были проведены дополнительные исследова-

ния и установлено, что вода при содержании 45% и более от общей массы композиции способна снижать T_c до минус 10°C, что делает воду чрезвычайно эффективным пластификатором для полиакриламида.

В другом источнике [18] подтверждается высокая пластифицирующая способность воды: при содержании воды 8 масс.% наблюдается снижение T_c гомополимера ПАА приблизительно на 70 градусов.

Давление. Высокое давление на образец полимера может повысить значение T_c материала за счет сжатия полимерных цепей и увеличения их жесткости. Но в случае, если в полимер введены жидкие пластификаторы или газообразователи, которые при нагревании могут улетучиваться, увеличение давления на образец может дать некорректную T_c [19].

Химическая структура. Значение T_c полимерного материала может варьироваться в зависимости от его состава. Поскольку полимеры с гибкой основной цепью имеют больше свободного объема и менее плотно упакованы, они имеют более низкие значения T_c . Например, материал представляет собой смесь двух разных гомополимеров или сополимер с плохо совместимыми блоками. В этом случае могут проявляться две температуры стеклования. Диапазон значений T_c для всей структуры может быть шире, чем у материала, изготовленного только из гомополимера А или гомополимера В. Так, при сополимеризации ПАА и полиметакриловой кислоты (ПМАК) с помощью метода ДСК можно определить две температуры стеклования: 119°C (ПАА) и 154°C (ПМАК) [20].

Полярные группы. Межмолекулярные взаимодействия между полимерными цепями можно существенно изменить, если модифицировать мономер полярными группами. В частности, для изменения значения T_c можно изменить тип и количество полярных групп, включенных в полимер. К примеру, введение в полиакриламид звеньев акриловой кислоты может снизить температуру стеклования полимера со 188 до 126°C [21].

Химическая сшивка и термическое разложение. Увеличение плотности сшивки может повысить значение T_c полимера, поскольку наличие поперечных связей между цепями ограничивает вращательное движение. В случае с ПАА, который при нагревании деструктурирует [22] и образует трехмерную структуру, усложняется процесс определения температуры стеклования полимера.

Добавление металлокомплексов (специальный комплекс $\text{Co}(\text{II})$ и винилферроцен VFc) в ПАА приводит к увеличению значений T_c на 60°C по сравнению с чистым полиакриламидом, что указывает на снижение макропористости композиции и повышение стабильности основной цепи полимера [23]. Вполне возможно, что металлокомплексы действуют как сшивающие агенты и, следовательно, увеличивают степень сшивки цепи, повышая температуру стеклования полимера.

Пластификаторы. Пластификаторы увеличивают свободный объем между полимерными цепями и уменьшают межмолекулярные силы, что приводит к снижению значения T_c .

В работах [24–29] представлены данные по пластификации полиакриламида серии АК-631, марка Н-150 (температура стеклования 190,8°C [24]), полученные методом ТМА на консистометре Хепплера. В качестве пластификаторов использовались малеиновый ангидрид и многоатомные спирты: сорбит, ксилит, изомальт, эритрит, ПЭГ-6000, триметилпропан (ТМП). Высокой пластифицирующей способностью, обусловленной их низкой температурой плавления, обладают ПЭГ-6000 и ТМП, что значительно снижает T_c смеси. Температура плавления ТМП варьируется от 56 до 61°C, ПЭГ-6000 – варьируется в интервале от 55 до 65°C. Данные вещества имеют близкую температуру плавления, что объясняет схожесть T_c пластифицированных смесей ПАА.

В публикациях [24, 27, 30–32] приводятся данные по пластификации полиакриламида серии АК-631, марка Н-150 (таблица 2), полученные методом ДСК.

Результаты, представленные в таблице 2, свидетельствуют о возможности снижения T_c ПАА на 60–70°C. Сравнивая таблицы 1 и 2, можно сделать вывод, что, оценивая T_c ПАА разными методами, можно получить разные экспериментальные данные, что усложняет процесс сбора данных. Особенно сильно разница видна для композиций, содержащих в качестве пластификатора сорбит.

Различие в экспериментальных данных указывает на то, что для корректного определения T_c ПАА нужно использовать разные методы определения T_c и сравнивать получаемые результаты.

Таблица 1. Влияние пластификатора на температуру стеклования полиакриламида [25, 29].

Пластификатор	T_c образцов при содержании пластификатора, масс.ч. на 100 масс. ч. ПАА					
	10	15	20	25	30	50
Сорбит	163	149	114	108	107	104
Малеиновый ангидрид	136	132	131	126	120	135
Ксилит	128	119	112	109	106	97
Изомальт	163	132	110	104	99	97
Эритрит	160	141	136	132	120	111
ПЭГ-6000	77	74	67	–	–	–
ТМП	87	73	67	–	–	–

В качестве веществ, снижающих T_c ПАА, могут быть использованы амидосодержащие соединения: карбамид, ацетамид, азодикарбонамид [33, 34]. Исследование температуры стеклования авторы проводили с помощью метода ТМА. Полученные данные вызывают некоторые сомнения. Предположительно, низкие значения T_c ПАА могли быть получены из-за остаточной влаги в полимере (так как авторы не просушивали ПАА, а только просеяли). Возможно, что при нагревании амидосодержащие соединения начали реагировать с ПАА и разлагаться с образованием низкомолекулярных летучих соединений, тем самым теряя массу, что могло вызвать ускорение деформации образцов под нагрузкой. В публикации [35] авторы исследуют T_c ПАА с помощью метода ДСК и получают более высокие значения T_c ПАА, что также вызывает подозрения в корректности данных, описанных в таблице 3.

К пластификаторам, используемым для пленочных материалов на основе ПАА, предъявляются особые требования [37]:

- пластификатор должен быть устойчивым к миграции в сторону поверхности пленки, чтобы не вызывать липкость;
- он должен иметь низкое давление пара, чтобы не испаряться из пленки, и иметь хорошую совместимость с ПАА;
- пластификатор не должен иметь запаха, не быть токсичным и способствовать сохранению или улучшению свойств пленки при низких температурах;
- он не должен оказывать влияния на оптические свойства пленочного материала, а также иметь низкий температурный градиент вязкости, чтобы не влиять на формирование пленки из раствора.

В качестве пластификаторов для пленочных материалов на основе ПАА можно использовать ортофосфорную кислоту, глицерин и сорбит [37, 38]. Пленки на основе данных пластификаторов имеют хорошую совместимость с полимером, не «мутнеют», не выпотевают и увеличивают предел прочности пленочных материалов.

Для пленочных материалов специального назначения в качестве пластификатора можно использовать дисперсию поливинилацетата [37]. Пленки на его основе нерастворимы, предположительно, за счет образования трехмерной структуры. Также дисперсия поливинилацетата повышает эластичность пленок на основе ПАА и даёт невысокую липкость пленки к подложке.

В публикации [36] российские ученые используют в качестве пластификаторов для композиций на основе ПАА ацетамид и малеиновый ангидрид (таблица 4). Анализ температуры стеклования ПАА привели с помощью метода ТМА.

Данные по T_c ПАА, представленные в таблице 4, отличаются от данных в таблицах 1 и 3, что представляет особый интерес. Предположительно T_c ПАА, пластифицированного ацетамидом, должна быть в интервале 75–90 градусов, так как температура

Таблица 2. Результаты ДСК композиций пластифицированного полиакриламида [27].

Показатель	Малеиновый ангидрид		Сорбит		Ксилит		ПАА
	5 масс.ч.	10 масс.ч.	5 масс.ч.	10 масс.ч.	5 масс.ч.	10 масс.ч.	
Начало перехода, °С	119,5	116,8	184,6	120,0	188,9	117,0	187,9
Температура стеклования (T_c , °С)	124,2	120,0	187,4	123,7	190,7	122,8	190,8
Конец перехода, °С	129,2	123,2	190,6	127,7	192,9	129,7	193,4

плавления ацетамида колеблется в районе от 79 до 83°C. Основываясь на этом, можно сделать вывод, что результаты, полученные с использованием ацетамида, приведенные в таблице 4, более корректные, чем данные в таблице 3. Расхождение данных по композициям ПАА, содержащих малеиновый ангидрид в качестве пластификатора, можно объяснить тем, что авторы [36] использовали нагрузку на консистометре Хепплера в 10 Н, что ускорило деформацию образцов и привело к более низким показателям T_c ПАА.

Таблица 3. Влияние амидосодержащих соединений на температуру стеклования ПАА [33].

Пластификатор	T_c образцов при содержании пластификатора, масс.ч. на 100 масс. ч. ПАА		
	5	10	15
Карбамид	46–48	56–59	46–49
Ацетамид	35–38	51–54	53–56
Азодикарбонамид	60–70	–	75–80

Таблица 4. Влияние типа и содержания пластификатора на температуру стеклования ПАА [36].

Пластификатор	T_c образцов при содержании пластификатора, масс.ч. на 100 масс. ч. ПАА				
	10	15	25	30	50
Малеиновый ангидрид	98–100	67–69	83–84	–	98–99
Ацетамид	81–82	74–76	81–83	83–88	–

Выводы

В статье рассмотрены факторы, влияющие на температуру стеклования полиакриламида, а также описаны требования, предъявляемые к пластификаторам для пленочных композиций полиакриламида. Знание этих факторов позволит лучше понимать природу пластификации полиакриламида.

В ходе работы были исследованы вещества, которые можно вводить в полиакриламид для снижения температуры стеклования и улучшения физико-механических характеристик получаемых материалов. Хорошей совместимостью с пленочными материалами на основе полиакриламида обладают сорбит, глицерин и ортофосфорная кислота. Данные пластификаторы рекомендуется вводить в пленочные материалы на основе полиакриламида.

Для снижения температуры стеклования композиционных материалов на основе полиакриламида можно использовать многоатомные спирты: ПЭГ-6000, ТМП, ксилит. Введение данных пластификаторов в композиции полиакриламида облегчит переработку композиций и улучшит диспергируемость ингредиентов смеси, а также повысит некоторые физико-механические характеристики.

Дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке новых пластифицирующих добавок, способных значительно улучшить технические характеристики композиций на основе полиакриламида Эта работа может быть использована в различных промышленных сферах, включая производство пленочных и газонаполненных материалов на основе полиакриламида.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание 0785.00.X6019)

Литература

1. Беляев И.И. Опыт использования полиакриламида при очистке питьевой воды // Гигиена и санитария. 1964. N 3. С. 66–68.
2. Катаева С.Е. Питьевая вода: полиакриламид и акриламид / Е.А. Катаева // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2013. N7. С. 54–57.
3. Умерзакова М. Б., Кравцова В. Д., Сариева Р. Б. Композиционные материалы на основе ациклического сополимида и полиакриламида // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93, N11. С. 1576–1581.

4. Родин А.С., Литосов Г.Э., Дворко И.М., Панфилов Д.А., Лавров Н.А. Исследование влияния полых корундовых микросфер на физико-механические характеристики пенополиимидов // Пластические массы. 2023. N5–6. С. 34–36.
5. Литосов Г.Э., Родин А.С., Дворко И.М., Панфилов Д.А., Лавров Н.А. Исследование влияния газообразователей на физико-механические характеристики композиций на основе полиакриламида // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. №4. С. 28–34.
6. Braun D., Cherdron H., Ritter H. Polymer synthesis: theory and practice: fundamentals, methods, experiments. // Heidelberg, Germany: Springer, 2001. С. 105–110.
7. Jamarani R., Erythropel H.C., Nicell J.A., Leask R. L., Maric, M. How green is your plasticizer? // Polymers. 2018. V. 10, N8. P. 834.
8. Sears J.K., Darby J.R. The technology of plasticizers // Wiley-Interscience. New York. 1982.
9. A Closer Look: Techniques for Obtaining Glass Transition Temperature of Polymeric Materials // Intertec Group. URL: <https://www.intertec.com/blog/2013/04-15-glass-transition-temperature/> (дата обращения: 25.12.2023).
10. Козлов Н.А. Лабораторные работы по дисциплине «Высокомолекулярные соединения»: методические указания. В 2 ч. Ч. 2. / сост. Н.А. Козлов; Владим. гос. ун-т. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. 66 с.
11. Differential Scanning Calorimetry (DSC) to Measure Heat Flow // InnovatechLabs. URL: <https://www.innovatechlabs.com/materials-analysis-dsc>. (дата обращения: 24.12.2023).
12. Determining Glass Transition Temperature Using DMA // The madison group. URL: <https://madisongroup.com/determining-glass-transition-temperature-using-dma/> (дата обращения: 24.12.2023).
13. Байбурдов Т.А., Шиповская А.Б. Синтез, химические и физико-химические свойства полимеров акриламида / Т.А. Байбурдов, А.Б. Шиповская. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», 2004. 67 с.
14. Юленков Н.С., Муравский А.А., Литосов Г.Э., Дворко И.М. Свойства композиций полиакриламида и пентапентаола // Наука сегодня: задачи и пути их решения: Материалы Международной научно-практической конференции. 2019. Т. 29. С. 52–53.
15. Chiantore O., Costa L., Guaita M. Glass temperatures of acrylamide polymers // Makromol. Chem., Rapid Commun; (Switzerland). 1982. T. 3, N5.
16. Shatat R.S., Niazi S.K., Ariffin A. Synthesis and Characterization of Different Molecular Weights Polyacrylamide / R.S. Shatat, S.K. Niazi, A. Ariffin // IOSR Journal of Applied Chemistry. 2017. T. 10, N 04. С. 67–73.
17. Maurer J.J., Schulz D.N., Siano D.B., Bock J. Thermal analysis of acrylamide-based polymers // Analytical Calorimetry: Volume 5. Boston, MA : Springer US, 1984. С. 43–55.
18. Yuen H.K., Tam E.P., Bulock J. W. On the glass transition of polyacrylamide // Analytical Calorimetry: Volume 5. Boston, MA : Springer US, 1984. С. 13–24.
19. Крыжановский В.К. Технические свойства пластмасс. СПб.: Профессия, 2014. 230 с.
20. Адамова Л.В., Сафронов А.П., Терзиян Т.В., Шабалдров П.А., Клюкина А.В. Термодинамика набухания в воде лиофилизированных ксерогелей полиакриламида и полиметакриловой кислоты // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2018. Т. 60, N2. С. 146–153.
21. Klein, J. Preparation and characterization of poly (acrylamide-co-acrylic acid) / J. Klein, R. Heitzmann // Die Makromolekulare Chemie: Macromolecular Chemistry and Physics. 1978. T. 179, N8. С. 1895–1904.
22. El-Sharif H. F., Yapati H., Kalluru S., Reddy S. M. Highly selective BSA imprinted polyacrylamide hydrogels facilitated by a metal-coding MIP approach // Acta biomaterialia. 2015. T. 28. С. 121–127.
23. Doble M., Kumar A. Biotreatment of industrial effluents – Elsevier, 2005.
24. Литосов Г.Э., Газонаполненные материалы на основе полиакриламида: дисс. канд. тех. наук. – Санкт-Петербург, СПбГТИ(ТУ), 2022. – 129 с.
25. Родин А.С., Муравский А.А. Исследование влияния модифицирующих добавок на температуру стеклования полиакриламида / Сборник материалов XI научной конференции «Традиции и Инновации», СПбГТИ(ТУ) СПб.: изд-во СПбГТИ(ТУ), 2020. С. 69.
26. Родин А.С., Муравский А.А. Анализ влияния пластификаторов на температуру стеклования полиакриламида // Физическая химия – основа новых технологий и материалов. 2020. С. 135–136.
27. Муравский А.А., Дворко И.М. Исследование свойств пластифицированного полиакриламида // Молодежь в науке: Новые аргументы : Сборник научных работ X Международного молодежного конкурса, Липецк, 01 марта 2019 года / Ответственный редактор А.В. Горбенко. – Липецк: Научное партнерство «Аргумент», 2019. С. 104–109.
28. Чистяков Н.А., Муравский А.А., Дворко И.М. Исследование пластифицирующего действия различных веществ в композициях полиакриламида // Научные технологии функциональных материалов. 2019. С. 10–11.
29. Тульский Г.В., Литосов Г.Э. Исследование пластификации полиакриламида гидроксилсодержащими соединениями // Неделя науки-2022 : Сборник тезисов XII научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием), Санкт-Петербург, 20–22 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 2022. С. 166.
30. Литосов Г.Э., Дворко И.М., Лавров Н.А., Чистяков А.А., Муравский А.А. Модификация полиакриламида гидроксил- и карбоксилсодержащими соединениями // Пластические массы. 2020. N 5–6. С. 25–28.
31. Чистяков Н.А., Муравский А.А., Дворко И.М. Влияние пластификаторов на свойства полиакриламидных композиций // Вестник научных конференций. 2019. № 4–2(44). С. 119–121.
32. Юленков Н.С., Чистяков Н.А., Литосов Г.Э., Дворко И.М. Исследование влияния пентапентаола на температуру стеклования полиакриламида // Неделя науки – 2019: Сборник тезисов IX научно-технической конференции (с международным участием) студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках мероприятий, посвященных 150-летию открытия Периодического закона химических элементов Д.И. Менделеевым, Санкт-Петербург, 01–03 апреля 2019 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 2019. С. 206.
33. Ширгалеева Э.Р. Определение температур стеклования композиций полиакриламида, модифицированного аминокислотными соединениями // Российская наука в современном мире: сборник статей LV международной научно-практической конференции, Москва, 15 июля 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ», 2023. С. 64. – EDN GYFH1Q.
34. Ширгалеева Э.Р., Якупов А.М. Исследование свойств композиций полиакриламида, модифицированного карбамидом термомеханическим методом // EurasiaScience : сборник статей LIV международной научно-практической конференции, Москва, 30 июня 2023 года / Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ», 2023. С. 28–29.
35. Ширгалеева Э.Р., Якупов А.М. Исследование свойств композиций полиакриламида методом дифференциально сканирующей калориметрии // EurasiaScience : сборник статей LIV международной научно-практической конференции, Москва, 30 июня 2023 года / Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ», 2023. С. 30–31.
36. Тараканова Л.В., Дворко И.М. Термомеханические исследования модифицированного полиакриламида // Неделя науки-2018: Сборник тезисов VIII научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в рамках мероприятий, посвященных 190-летию со дня основания Технологического института (с международным участием). СПб: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 2018. С. 172.
37. Зимагулова Л.А., Сидоров Ю.Д., Василенко С.В., Поливанов М.А. Влияние пластификаторов на физико-механические свойства пленочных материалов на основе полиакриламида // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, N23. С. 67–71.
38. Миронова А.П., Литосов Г.Э., Панфилов Д.А. Получение пленочных композиций, модифицированных карбоксил- и гидроксилсодержащими соединениями на основе полиакриламида // Научный альманах. 2023. N5. С. 87–92.